

低コスト水中ドローンを用いた水中調査システムの開発

—多地点観測と AI 活用による生物分布解析の実現—

松本 慎太郎(大阪明星高等学校 2年)・大塚雄日(立命館慶祥高等学校 2年)

*Development of a Cost-Effective Underwater Drone System for Aquatic Surveys:
Achieving Biological Distribution Analysis Through Multi-Point Observations and AI Utilization*

Shintaro Matsumoto and Yuhi Otsuka

Abstract

We developed a cost-effective autonomous underwater drone designed for environmental monitoring and biological distribution analysis. This system addresses the increasing demand for efficient and affordable monitoring solutions in lakes and deep-sea environments. In contrast to commercially available underwater drones, which are often expensive and have limited functionality, our model offers high-pressure resistance up to 140 meters and a lightweight design, making it well-suited for long-term, multi-point observations. Field tests conducted in Lake Biwa demonstrated the system's ability to collect stable, high-precision data, including temperature measurements and real-time imaging of the lakebed.

Key Words : *underwater drone, environmental monitoring, cost-effective design, deepwater observation*



我々が開発した水中ドローン

1. はじめに

近年、地球温暖化等の様々な要因により、湖や海が環境が悪化している。その例として、水温の上昇による魚の生息域の変化や、琵琶湖における全層循環の停止が挙げられる。

そのため、海や湖などの環境調査や気候モニタリングを目的として、複数地点で深い水深に対応した長期間の観測を行う水中ドローン(AUV: Autonomous Underwater Vehicle)が近年求められている。

しかしながら、現在販売されている環境調査用の水中ドローンは、1機あたりのコストが数百万円と高額であるため、複数地点での観測が困難である。この課題を解決するため、我々は1機あたりのコストを10万円以下に抑えつつ、水深・水温や水中映像などの環境情報を長期間安定して観測できる水中ドローンの開発を行うことにした。

2. 開発目的

本研究では、低コストかつ高性能な水中ドローンの開発を通じて、水環境の包括的な調査システムの実現を目指している。具体的には以下の3つの主要な開発目標を設定した。

第一に、水深140mまでの耐圧性能を実現することで、琵琶湖全域での環境調査を可能にする。この性能は、琵琶湖最深部(約104m)を含む湖沼全域での調査を可能にするだけでなく、沿岸域から深水域まで、様々な水深帯における生態系や環境変動の観測を実現する。これにより、従来は観測が困難であった深層域での環境変化も詳細に把握することが可能となる。

第二に、高精度での水深・水温データの取得を実現する。特に水温データは、琵琶湖の全層循環という重要な生態学的現象の観測において極めて重要な指標となる。

琵琶湖の全層循環とは、冬季に表層水が冷却されて密度が上昇し、深層水と入れ替わることで起こる鉛直混合現象である。この現象により、深層への酸素供給が行われ、底生生物の生存に必要な溶解酸素が補給される。また、深層に蓄積された栄養塩が表層へと運ばれることで、プランクトンをはじめとする生物の生産活動が支えられている。

しかし近年、地球温暖化の影響により琵琶湖の全層循環の停滞が観察されており、生態系への深刻な影響が懸念されている。そのため、高精度な水温データの取得は、この重要な環境変動を監視する上で不可欠である。

第三に、一機あたりのコストを10万円以下に抑えることで、多点同時観測を実現可能にする。従来の水中ドローンは数百万円という高額な費用が必要であり、複数地点での同時観測が経済的に困難であった。本研究では、低コスト化を実現しながらも必要な性能を確保することで、より広範囲での同時観測を可能にし、空間的により詳細な環境モニタリングを実現する。これにより、琵琶湖全域における水温構造の変動や、全層循環の進行状況をより正確に把握することが可能となり、効果的な環境保全策の立案に貢献することを目指す。

3. 開発詳細

3.1. 開発概要

我々は、水中ドローンをデータの取得を行うセンシング部と、浮力の調整を行い機体の動きを制御する浮力調整機構部の2つの独立したコンポーネントとして開発した。

センシング部には、高精度水温センサ・水圧センサによる環境データの取得機能と、4Kカメラを用いた物理情報の取得機能を備えている。また、浮力調整機構部への制御信号を送信し、機体の動作制御も行う。

浮力調整機構部では、圧縮炭酸ガスを用い、電磁弁でガスの流れを制御することで風船に空気を出し入れし、浮力を調整する。この機構は、数秒間の電磁弁動作で浮力調整を行うことが可能であり、従来の大量の電気を消費するモーターを使用した制御方式の水中ドローンと比較して、非常に省電力で浮力を制御できる。これにより、外部からの電源供給を必要としない、長期間のデータセンシングが実現した。

以下写真(fig1)は、センシング部と浮力調整機構部の画像である。



Fig.1 センシング部及び浮力調整機構部

3.2. データセンシング機構の開発

3.2.1. 耐圧機構

水深 100m 以上の地点では、地上の 10 倍以上の圧力がかかるため、防水性・耐圧性が非常に重要となる。

このような高圧環境に対応するために、耐圧容器として Blue Robotics 社の防水エンクロージャ (WTE) を採用した。この耐圧容器は水深 140m までの耐圧性能を持ち、琵琶湖を含む広範囲の水域における調査を可能にしている。

耐圧容器の選定理由は、その高い信頼性にある。この耐圧容器は JAMSTEC (海洋研究開発機構) や NOAA (アメリカ海洋大気庁) といった国際的な研究機関で広く使用されており、厳しい環境下でも実績がある。また、設計面では優れた密閉性と耐久性が保証されており、複数回の使用や長期間の観測においても安定した性能を発揮できる。

3.2.2. データセンシング機構

機体には、高精度な温度センサである Measurement Specialties 社製 TSYS01 を採用し、 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ という高精度での温度データ取得を実現した。水圧センサには Blue Robotics 社製 MS5837 を採用し、解像度は $\pm 2\text{mm}$ 、絶対精度は $\pm 100\text{cm}$ に達しており、正確な深度データの取得が可能となっている。

さらに、機体内部に 4k カメラ (GoPro Hero10) を搭載し、4k 解像度での物理情報 (映像データ) の取得が可能となった。これにより、水中環境での視覚的モニタリングを高い精度で行える様になり、生態系や物理的な環境変化を詳細に記録できる。

データのセンシング、保存および浮力調整機構部への制御信号の送信には、ワンボードマイコンの Arduino Nano Every を採用し、これに専用 PCB 回路を設計・作成してシステムを構築した。

電源には 10000mAh の大容量リチウムイオンポリマーバッテリーを使用しており、長期間のデータセンシングが可能となり、フィールドでの連続観測に対応できるようになっている。

電子基板やカメラなどの各コンポーネントを機体内部に確実に固定するため、部品を 3DCAD を用いて設計し・3D プリンタで製造した (Fig. 2)。機体の内部構造は、衝撃や振動に対する耐性を考慮した設計となっており、過酷な水中環境下でも安定した性能を発揮する。

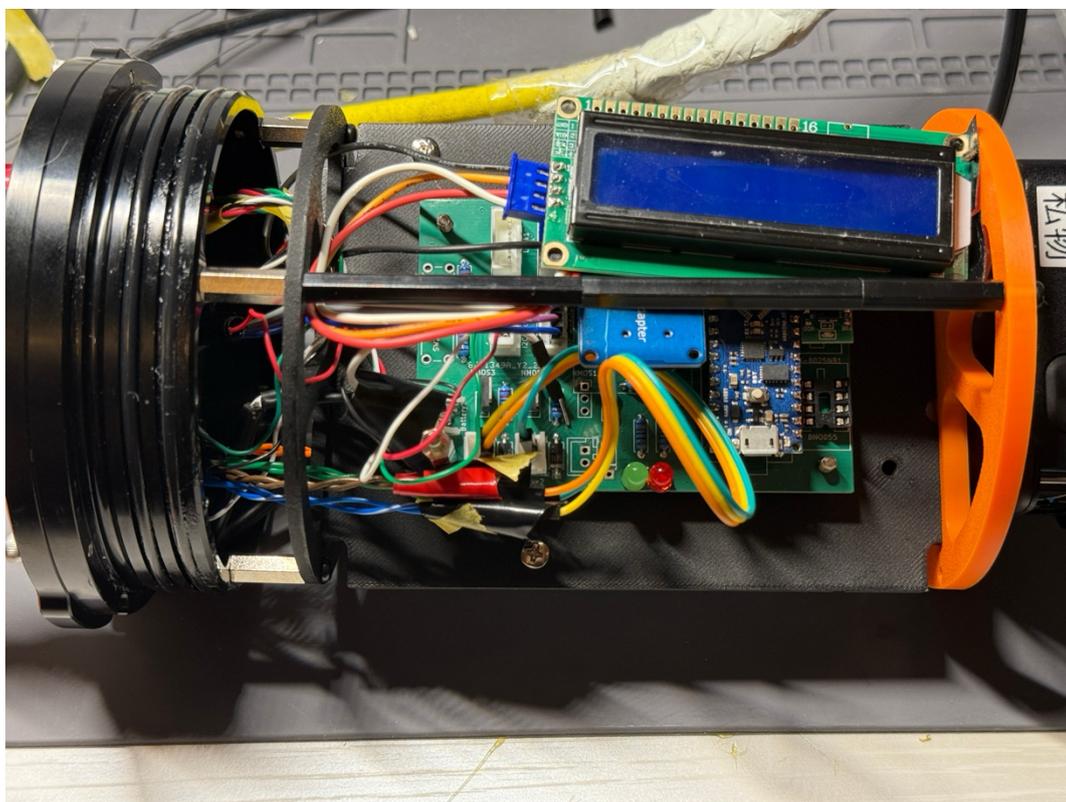


Fig. 2 設計・製造を行なった内部固定部品

3.3. 浮力調整機構部の開発

我々が開発した機体は、動力に圧縮炭酸ガスを使用し、2つの電磁弁を制御することでガスの流れを調整し、風船を膨らまし、萎ませることで機体の浮力を制御している。

この圧力調整機構の概略図を fig. 3 に示す。

浮力調整機構部の管体には、直径 100mm の塩ビ管を用い、ドリルで穴を開けたものをを使用している。そして、電子部品である電磁弁のみエポキシパテを用いて防水加工を施している。

本機構により、浮力の調整が可能となり水中環境や水深の変化に応じた柔軟な浮力制御が可能となる。また、この設計により機体の軽量化とメンテナンスの容易さも実現している。

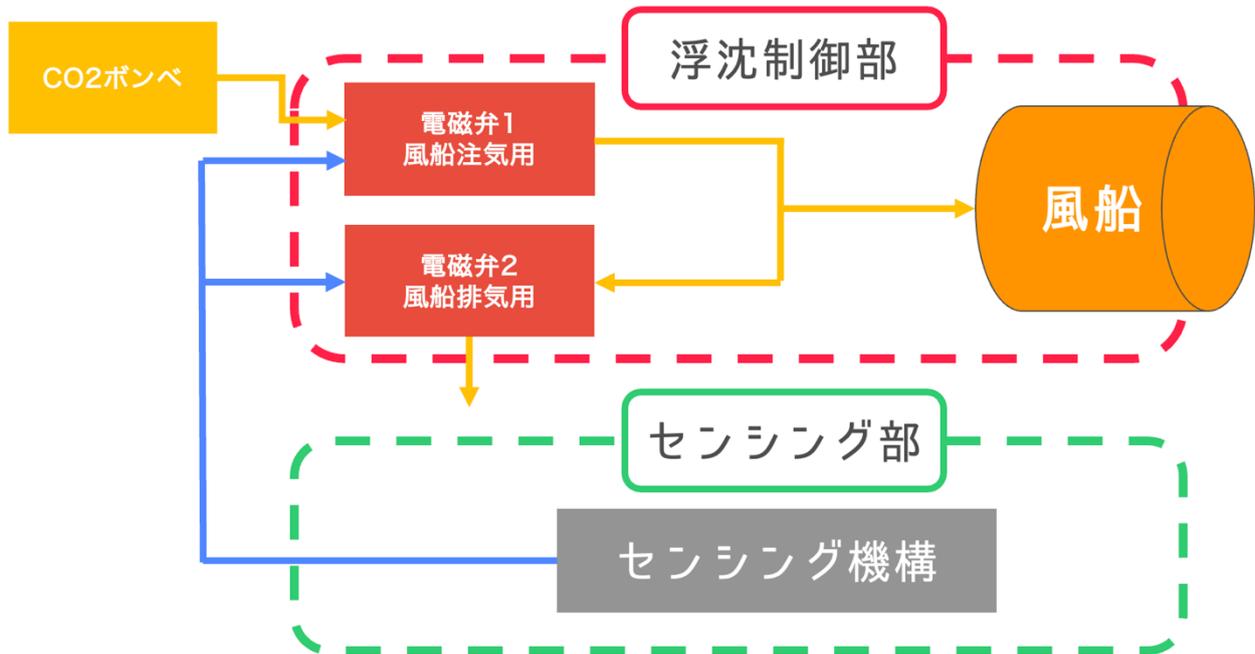


Fig. 3 圧力調整機構 概略図

4. 性能評価試験

4.1. 密閉試験

本試験の目的は、センシング部の密閉性能を確認することである。本機器が高圧環境下でも正常に動作するためには、筐体の密閉性が確保されていることが求められる。そこで、耐圧容器内を減圧し、一定期間の圧力変動を計測することで、筐体に隙間がないことを確認する。

試験方法として、耐圧容器に真空ポンプを用いて容器内の圧力を -50kPa まで減圧した後、15分間その状態を保持する。この際に、容器内の圧力変動が 1.5kPa 以下であれば、筐体が外部環境からの気体の侵入を防ぐ密閉性能を有すると判断する。

試験結果として、圧力変動は 1.5kPa 以下であり、十分な密閉性能を備えていることが確認された。試験の様子を Fig. 4 に示す。

4.2. 長時間データ取得試験

長期間にわたり安定したデータ取得性能を実証するため、観測機器の耐久性と電力消費のバランスを確認することを目的に、地上で観測機器を用いて12時間連続のデータ取得試験を実施した。

本試験では、データ取得中に全ての機能が正常に動作し、バッテリー残量が確保されることが求められる。長時間の運用試験は、特に屋外環境での連続観測において重要であり、バッテリー寿命と信頼性の評価に役立つ。

試験方法として、観測機器を地上に設置し、バッテリーをフル充電した状態から起動、連続してデータ取得を行った。

12時間の連続動作後にバッテリー残量と機器の動作状況を確認し、各機能が意図通りに動作しているかをチェックした。

試験の結果、バッテリー残量が50%以上を維持した状態で、データ取得をはじめとする全ての機能が正常に動作していることを確認した。この結果から、本機器が長時間の観測作業でも安定したパフォーマンスを発揮できることが証明された。試験の様子を Fig. 7 に示す。

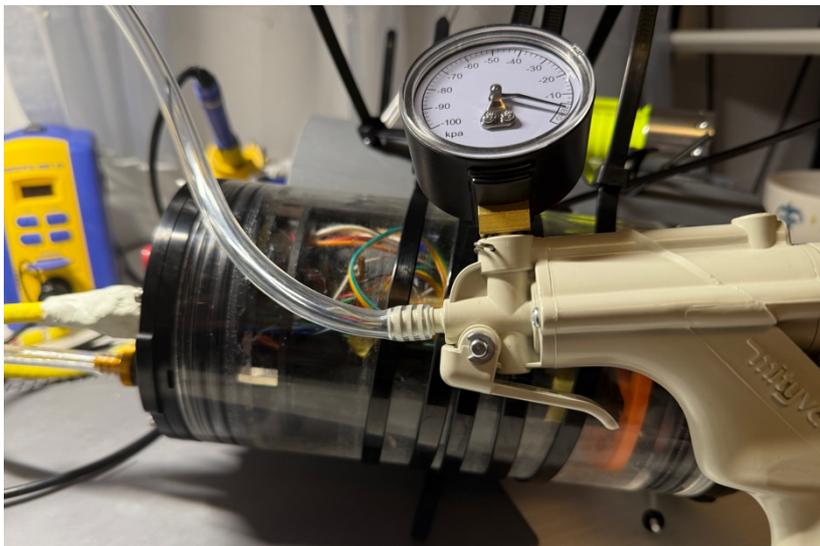


Fig. 4 密閉試験の様子

5. 琵琶湖実地試験

5.1. 試験目的

開発した水中ドローンの性能を実際の自然環境で確認するため、琵琶湖において実地試験を実施する。

この試験の主な目的は、まず深度 20m における耐圧性能の確認であり、水中での極端な圧力環境でも機体が安定して動作するかを確かめることである。さらに、試験では水圧と水温のデータを高周期で取得し、データ収集が正確に行われるかどうかを検証する。

加えて、試験では 4k カメラを使用し、高画質な湖底映像の撮影も行なう。これにより、水中の環境などといった詳細な視覚的記録を得ることができ、今後の調査やデータ解析に役立てる。

5.2. 試験方法

試験は 2024 年 11 月 4 日 14 時に琵琶湖の北部、安曇川沖付近（緯度 35.320377873、経度 136.08332373）で実施する。（fig.5 の地図中 x 印地点）

現地にはゴムボートを使用して移動し、水中ドローンを安全に放流するため、予防策として係留用のナイロンロープを機体に取り付ける。放流後、ドローンを湖底まで潜行させ、約 30 分間データの取得を行う。データ収集が完了した後は、浮沈機構を作動させて機体を水面まで上昇させ、全体の動作が正常であることを確認する。



Fig.5 試験場所

5.3. 試験結果

試験は成功し、全ての機構が正常に動作した。

それぞれのセンサについての結果を以下に示す。

5.3.1. カメラデータ

潜水から浮上までの約 50 分間の動画を正常な取得に成功した。

特に、4K カメラによる湖底の高解像度映像の撮影に成功した。試験を行なった安曇川沖での湖底撮影に成功したのは世界で我々が初である。

Fig. 6 に取得に成功した湖底の画像を示す。

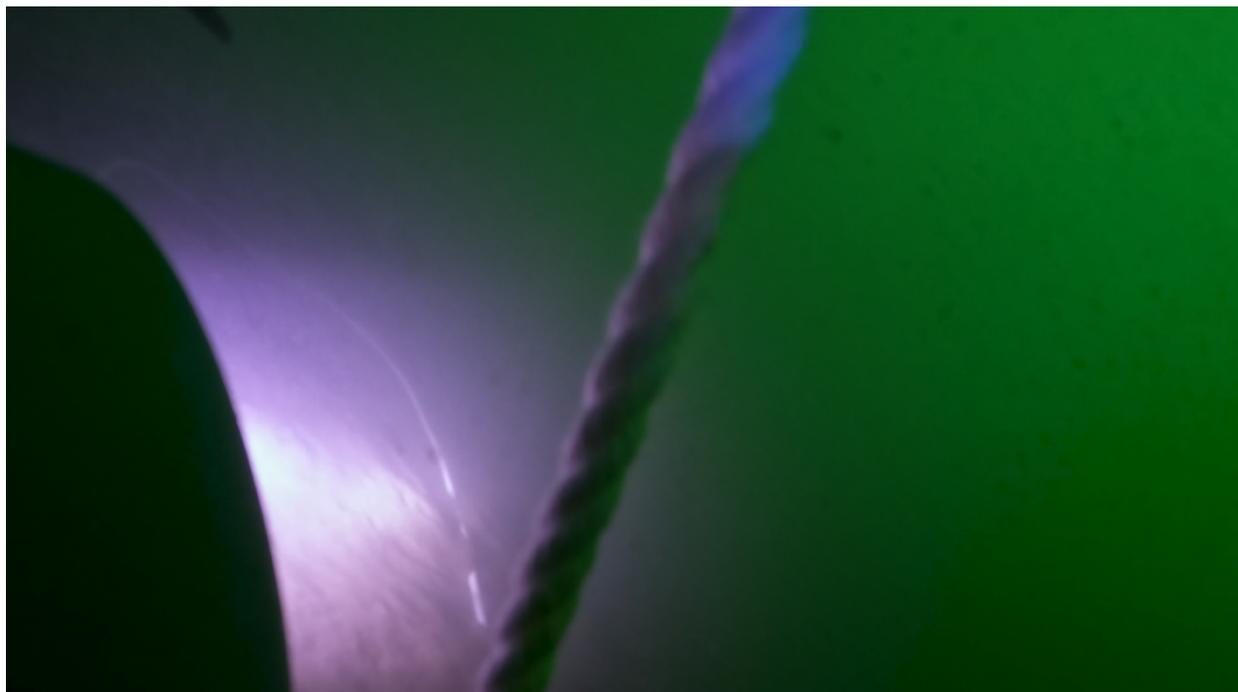


Fig. 6 安曇川沖の湖底画像

5.3.2. 浮沈機構の動作

浮沈機構は正常に動作し、機体が水面まで上昇した。内部カメラ映像を確認したところ、風船が設計通りに膨らむ様子を確認できた。

5.3.3. 水温・水深データ

約 0.3 秒間隔での高精度な水温・水深データの取得に成功した。

Fig. 7 に、数値解析ソフト MATLAB を使用して作成した水温と水深のグラフを示す。データによると、水深 0~8m の範囲では水温と水深に相関が見られたが、それ以降の深度では相関が失われた。この現象については、後の章でその原因を考察する。

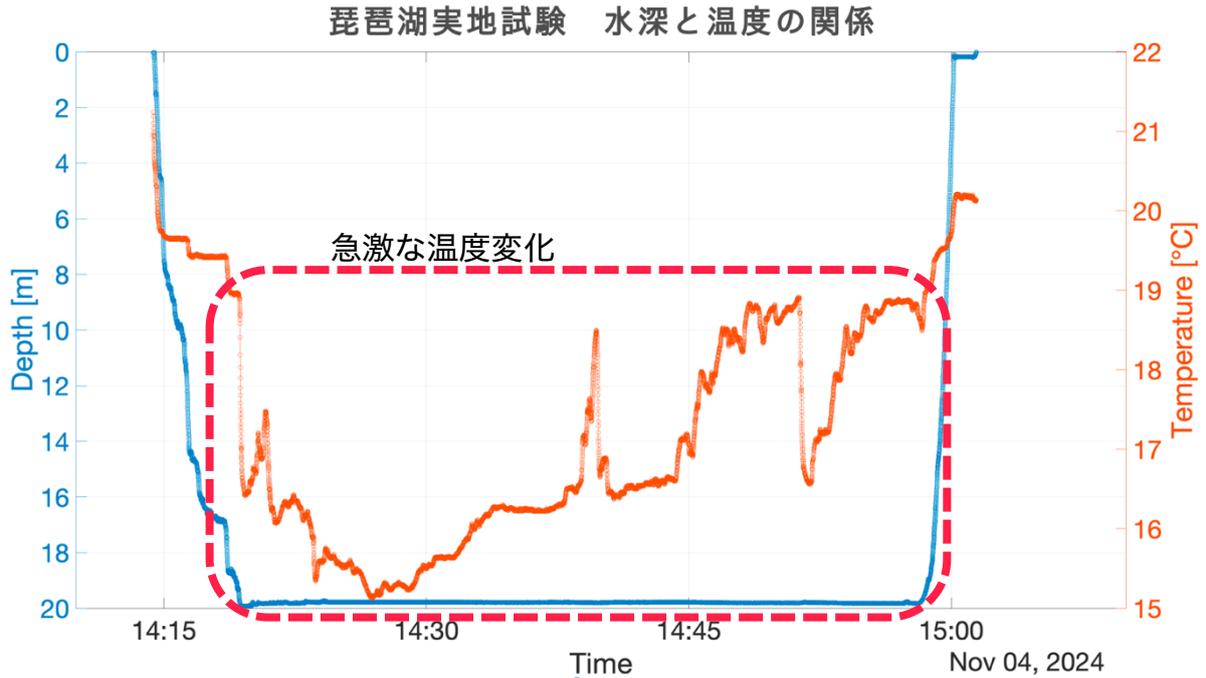


Fig. 7 試験にて取得した水深及び水温データグラフ

5. 4. 考察

取得したデータから、今回観測した水深8 m以降の急激な温度変化(Fig. 7 赤枠部分)と速い水流は湖沼などで見られる表層にある水温の高い層と深度の低い地点にある水温の低い層の間にある急激に水の温度が変わる層である「水温躍層」(fig. 8)を観測した可能性があると考えた。

今回着底した水深約8~20m 地点の付近が水温躍層となっており、その温度変化によって起きた水流により機体が流されていたのではないかと考察する。

今後さらに多くのデータ観測を行うことで、詳細な分析と原因の究明を行いたい。

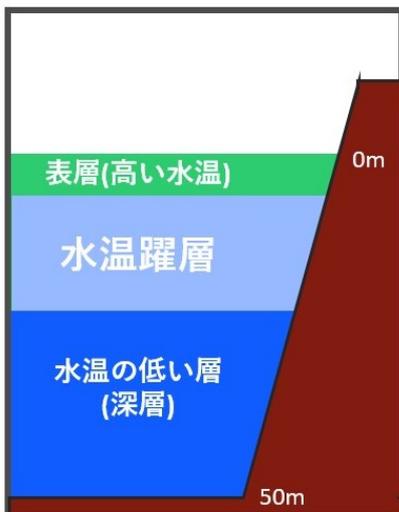


Fig. 8 水温躍層の概略図

6. 今後の課題・展望

今後の課題として、水深 50m 程度における防水性能および浮沈機構の試験を実施する必要があると考えている。

現時点では、実際の環境下での防水性能および浮沈機能の限界が不明であり、さらなる性能評価が求められる。したがって、より深い水深での実験を行い、機体の耐久性と機能性を詳細に検証することを計画している。

さらに、将来的には今回開発した機体の子機として運用し、データ通信機能や動力機構を搭載した親機の開発を進めていく予定である (fig. 9)。親機は子機とケーブルで接続し、水上を自律的に移動しながら調査活動を行う設計を目指す。この親機の導入により、調査地点への自動移動が可能となり、子機で取得したデータを地上へリアルタイムでアップロードできるようにする。これにより、リアルタイムでのデータ通信と効率的な環境モニタリングが実現することが期待される。

また、別研究にて我々が MATLAB を使用し、開発を行った LLM を用いた魚類識別 AI (fig. 10) を用い、水中ドローンのカメラより得られた動画を用いることで生態系調査を行いたいと考えている。

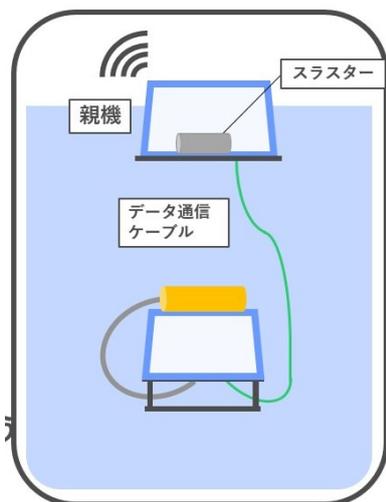


Fig. 9 今後の開発イメージ図



Fig. 10 開発を行なった魚類識別 AI
参考資料[4]のリンクよりポスターが観覧可能

7. 参考文献

- [1] 滋賀県琵琶湖環境科学研究センター (lberi.jp)
「全層循環の概要・仕組み」
- [2] 国土交通省 「琵琶湖の水理・水質特性」
- [3] 速水 祐一, 青木 豊明, 藤原 建紀, 向井 浩, 田中 義光
「琵琶湖北湖における内部サージが栄養塩・懸濁物の輸送に与える影響」
- [4] 松本 慎太郎, 大塚 雄日, 神山 瑠星 小松 琢磨
「ニューラルネットワーク及び LLM を用いた魚類の検出と分類」

<https://www.matlabexpo.com/content/dam/mathworks/mathworks-dot-com/company/events/conferences/matlab-expo-japan/2024/jp-expo-2024-poster-e-kagaku-fish-classification.pdf>